

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.002

叶大鹏, 青家兴, 吴逸腾, 等. 菌草穴盘苗取投苗装置设计与试验分析[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 09-16, 53

Ye Dapeng, Qing Jiaying, Wu Yiteng, et al. Design and experiments analysis of automatic taking and throwing device for "Juncao" plug seedlings [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 09-16, 53

菌草穴盘苗取投苗装置设计与试验分析*

叶大鹏^{1,2}, 青家兴^{1,2}, 吴逸腾¹, 赖鸿康¹, 翁海勇^{1,2}, 李庆^{1,2}

(1. 福建农林大学机电工程学院, 福州市, 350100; 2. 福建省农业信息感知技术重点实验室, 福州市, 350100)

摘要: 目前菌草穴盘苗移栽过程中缺乏自动取投苗装置, 通过分析取投苗装置的工作原理, 建立运动学模型并优化结构参数, 研发一种六杆式取投苗装置。根据菌草穴盘苗钵体的抗压力学特性、取投苗装置的基本约束与空间约束, 优化分析得到各杆件的结构参数, 建立虚拟样机得到仿真轨迹和运动学参数。进一步研制样机, 结合高速摄像技术获取取投苗装置的实际运动轨迹, 对比两种轨迹的一致程度, 验证装置设计的合理性。以取投“绿洲一号”菌草穴盘苗为例, 将主动杆转速、送苗装置倾斜角以及钵体含水率作为试验因素, 取苗成功率、投苗成功率作为响应指标, 开展三因素三水平正交试验。试验结果表明, 在主动杆转速为 30 r/min、钵体含水率为 60%、送苗装置倾斜角为 50° 时, 取投苗的效果最优。重复试验表明, 在最优因素水平下, 取苗成功率与投苗成功率分别为 95.31% 和 93.4%。

关键词: 菌草穴盘苗; 取投苗装置; 六杆装置; 自动化移栽设备

中图分类号: S223.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 10-0009-09

Design and experiments analysis of automatic taking and throwing device for "Juncao" plug seedlings

Ye Dapeng^{1,2}, Qing Jiaying^{1,2}, Wu Yiteng¹, Lai Hongkang¹, Weng Haiyong^{1,2}, Li Qing^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350100, China; 2. Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensing Technology, Fuzhou, 350100, China)

Abstract: Seedling transplanting was considered as ones of key steps during "Juncao" planting. However, there is a lack of automatic taking and throwing devices in the in recent years. Alternatively, developing an automatic taking and throwing device can improve the transplanting efficiency as well as reduce labor intensity. This study aimed to develop a six-bar device by analyzing the working principle of device, establishing a kinematic model and optimizing structural parameters. According to the anti-pressure characteristics of the "Juncao" plug seedlings bowl and the basic and spatial constraints of the device, the structural parameters of each rod were optimized and analyzed, and the simulation trajectories and kinematic parameters were obtained by establishing a virtual prototype. Furthermore, a prototype was developed and then actual motion trajectory of the taking and throwing device was obtained via a high-speed camera. The consistency between the two trajectories was compared to verify the reasonability of the prototype. In order to ensure the availability of the developed device, the operation of taking and throwing was carried out by using "Juncao" (Oasis No. 1) plug seedlings. The rotation speed of the active rod, the inclination angle of the seedling delivery device and the moisture content of the bowl were used as experimental factors, and the success rates of taking and throwing were used as response indicators. A three-factor and three-level orthogonal experiment was performed. The bench test showed that it achieved the best performance when the driving rod speed, water content of the bowl and inclination angle of the seedling feeding device was 30 r/min, 60% and 50°, respectively. Repetitive experiments by using the optimal factor level also reached the success rates of taking and throwing of 95.31% and 93.4%.

收稿日期: 2024年1月19日 修回日期: 2024年2月27日

* 基金项目: 福建省重大专项(2021NZ0101); 福建省自然科学基金(KJB23066XA); 福建省林业科学技术攻关项目(2023FKJ01); 福建省大学生创新创业训练计划项目(S202310389049); 福建农林大学交叉学科项目(XKJC-712021030)

第一作者: 叶大鹏, 男, 1971年生, 福建霞浦人, 博士, 教授; 研究方向为农业机械自动化控制与研发。E-mail: ydp@fafu.edu.cn

通讯作者: 李庆, 女, 1983年生, 山东烟台人, 博士, 讲师; 研究方向为农机装备及其自动化。E-mail: liqing2013@fafu.edu.cn

Keywords: “Juncao” plug seedlings; taking and throwing seedlings device; six-bar device; automatic transplanting equipment

0 引言

菌草的粗蛋白、纤维素、糖类等含量优于大部分牧草^[1],现多被用于制作成畜牧中的饲料、培育菌类的菌料,并且在造纸、清洁能源等领域均有广泛运用,因其抗逆性强、抗碱性强、抗旱等优点,也被运用于盐碱地以及荒漠地区的治理^[2]。菌草需求日渐增加,种植规模逐渐提高,现存的移栽种植方式多为半机械化移栽,难以满足各领域的需求,取投苗工作环节多由人工完成,劳动强度偏大,移栽效率较低^[3]。设计并研制用于菌草穴盘苗移栽的取投苗装置意义重大。

诸多学者已对穴盘苗移栽的取投苗关键部件开展研究,提出了多种取苗方式:夹茎式^[4]、夹钵式^[5]、顶出式^[6]等。谢守勇等^[7]运用滚珠丝杆与直线滑轨设计了往复夹茎式取投苗机构,避免了对蔬菜根系的损伤,但存在穴盘苗苗茎的倾倒而出现夹持茎秆失败的情况;李华等^[8]运用二阶椭圆齿轮行星轮系与凸轮摆杆机构,设计了番茄穴盘苗的夹茎式取苗机构,取苗效率较高,运动轨迹稳定,但机构在高速工作下存在振动,夹持的苗将会从夹持机构上脱落;俞高红等^[9]设计了非圆齿轮行星轮系八行同步取苗机构并运用MatLab软件开发反求设计平台,完成关键参数设计,机构存在部分取苗针插入钵体的深度不够,持苗过程中出现掉落;刘念聪等^[10]设计了单摆式取苗系统,采用气动的方式实现对钵体的夹持,由于该系统为双行移栽设计,左右两侧均有取投苗装置,故移栽过程中存在振动影响取投苗的成功率;文永双等^[11]设计了一种顶出式蔬菜穴盘苗取苗装置,此取苗方式对钵体的力学性能要求较高,若钵体力学性能较差,将导致钵体基质损失率过大,破坏蔬菜根系;本文前期已展开“绿洲一号”菌草的茎秆力学试验,分析得到夹茎式取苗方式将会导致部分茎秆的损伤、断裂^[12];培育菌草的穴盘纵向深度过大,若采用顶出式取苗方式,顶出距离过长,取苗失败率增大。

因此,本文提出一种六杆式夹钵式菌草穴盘苗(以下简称:穴盘苗)取投苗装置,分析该装置的设计原理,建立运动学模型并完成各结构参数的优化设计。

1 整机设计与工作原理

1.1 整机设计

研制的取投苗装置搭载于试验平台上,如图1所示。试验平台由送苗装置、支撑底座、横向移苗装置、运苗装置以及取投苗装置等构成。支撑底座支撑整个试验平台;穴盘倾斜放置于送苗装置上方,该装置带动

穴盘沿斜向下方向(纵向)移动。横向移苗装置由滑台电机、滑台丝杆以及滑台构成,滑台电机转动,滑台随之左右移动,与滑台垂直固定于一体的送苗装置便左右横向移动,两装置的配合工作实现纵向与横向的送苗功能。运苗装置的运苗杯围绕取投苗装置旋转运动,不断接运穴盘苗。

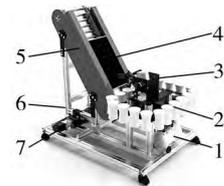


图1 试验平台

Fig. 1 Test platform

- 1.气源 2.运苗装置 3.取投苗装置 4.穴盘
5.送苗装置 6.支撑底座 7.横向移苗装置

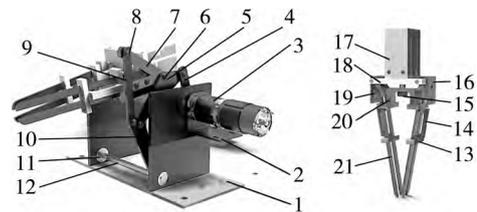


图2 取投苗装置整体图

Fig. 2 Structural diagram of seedling taking and throwing device

- 1.支撑板 2.机架 3.驱动电机 4.主动杆 5.从动杆Ⅱ
6.苗爪连接螺钉 7.取苗杆 8.杆件铆钉 9.从动杆Ⅰ 10.摆杆
11.轴承 12.支撑轴 13.推苗环 14.推苗拉杆 15.推杆固定螺母
16.苗爪安装块 17.气缸推杆 18.苗爪支撑板 19.苗针固定块
20.推苗块 21.取苗针

取苗机构与杆件传动机构构成取投苗装置见图2。取苗机构作用:将穴盘苗钵体夹紧与投放;杆件传动机构为动力传递,取苗机构随之运动到取投苗位置。取苗机构由气缸推杆、苗爪支撑板、苗针固定块、推苗块、取苗针、推苗环、推苗拉杆、推杆固定螺母等构成。杆件传动机构主要由主动杆、从动杆Ⅰ、从动杆Ⅱ、取苗杆、机架、支撑轴、驱动电机、杆件铆钉等构成。杆件传动机构的取苗杆通过铆钉与取苗机构的苗爪安装块连接,实现两机构的配合固定。

1.2 工作原理

取投苗装置工作时,主动杆AH与机架上的驱动电机连接,并随电机轴开始匀速转动,从动杆Ⅰ、从动杆Ⅱ、取苗杆以及摆杆随之运动,连接于取苗杆上的取苗机构随取苗杆的运动进行夹钵取苗。初始状态,取苗机构的气缸推杆处于推出状态,取苗针处于打开状态,当取苗机构的取苗针插入穴盘苗的钵体中,气缸推杆带动推苗块以及推苗环向上收缩,取苗针夹紧穴盘苗钵体,随着杆件传动机构的运动,将穴盘内的苗夹紧取出,取

苗机构随取苗杆的继续运动到运苗装置的运苗杯上方, 气缸推杆将推苗块以及推苗环向下推出, 取苗针打开, 穴盘苗随之掉落运苗杯内, 随运苗杯传送到移栽位置。

取投苗装置具体工作过程, 如图 3 所示。主动杆 AH 顺时针转动, 固定于取苗杆 (EGF) 的 GE 段上的取苗机构运动 (E 为取苗机构的末端点, 故 E 点轨迹为取投苗轨迹), 其中 $O_1O_2O_3O_4O_5O_6$ 为 E 点运动轨迹。(1) O_1O_2 段为取苗机构准备进入穴盘苗钵体, 如图 3(a) 所示。(2) O_2O_3 段为取苗机构继续运动以特定的入土角插入钵体且取苗针夹紧钵体, 其中 O_3 为取苗点, 如图 3(b) 所示。(3) O_3O_4 段为取苗机构将钵体夹紧, 向上运动并逐渐拔出钵体并继续保持对钵体的夹持, 如图 3(c) 所示。(4) O_4O_5 段为取苗机构到达投苗位置, 取苗针打开, 穴盘苗在重力作用掉落到运苗杯, 完成投苗, 其中 O_5 为投苗点, 如图 3(d) 所示。

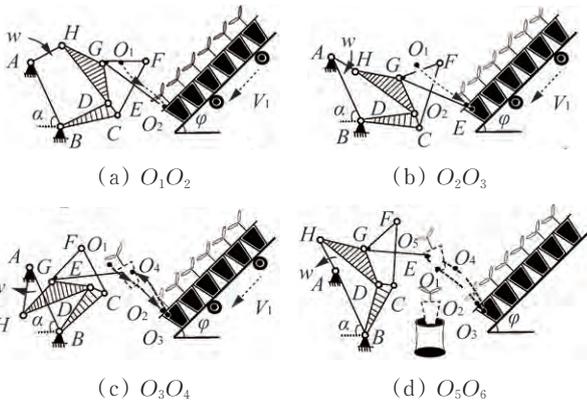


图 3 取投苗装置工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of seedling taking and throwing device

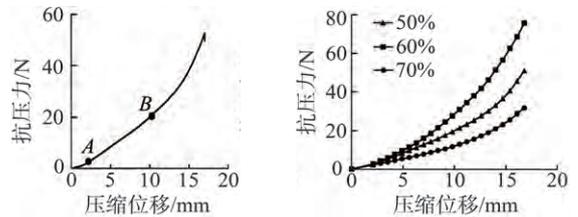
1.3 钵体力学试验

1.3.1 钵体抗压力学试验

取投苗装置的取苗机构为夹钵式取苗, 应探究穴盘苗钵体的抗压力学特性规律。本文选取培育 30 天的“绿洲一号”穴盘苗 (泥炭土、蛭石、珍珠岩基质配比 (体积比) 为 2:1:1) 为试验对象, 采用岛津 AG-X 拉力试验机对穴盘苗钵体开展抗压力试验, 钵体含水率范围为 50%~70%, 故分别对含水率 50%、60% 以及 70% 的钵体开展抗压力学特性试验并得到抗压力特性曲线。

由钵体抗压力特性曲线图 4(a) 可知, 当压缩位移开始增大, 穴盘苗基质钵体与压盘刚开始发生接触, 抗压力逐渐增加, 此刻抗压力与压缩位移呈正相关; 压缩位移增加到 A 点后, 斜率发生变化, 抗压力与压缩位移呈线性关系, 钵体表现出线弹性; 压缩位移增大到 B 点后, 抗压力随压缩位移呈非线性增长, 直到钵体被完全压实^[13], B 点的压缩位移、抗压力称为压缩破碎量以及最大抗压力, 反应钵体的抗压力学特性。

测试得到三种含水率下的钵体抗压力学特性, 如图 4(b) 所示, 钵体的抗压力学特性随钵体的含水率增大呈现先增大后减小的趋势, 含水率为 60% 左右的钵体具有较优的压缩力学特性。



(a) 70% 含水率钵体抗压力特性曲线 (b) 三种含水率下抗压力特性曲线

图 4 穴盘苗钵体抗压力学特性曲线

Fig. 4 Compressive mechanical characteristic curve of the pot body with plug seedlings

1.3.2 散落特性试验

穴盘苗的钵体掉落散落规律影响着取投苗装置投苗的钵体破碎率。选取“绿洲一号”菌草穴盘苗 40 株, 平均分为 4 组并采用电子秤 (精度为 0.01 g) 测量每组的单株质量为 M_0 , 万能试验机的夹具夹持穴盘苗茎秆部分从而带动钵体的上下移动, 并使得 4 组穴盘苗钵体底部与运苗杯底部的下落距离 l_0 为 100 mm、200 mm、300 mm、400 mm。试验开始, 松开万能试验机夹具, 穴盘苗钵体自由掉落到运苗杯内, 散落特性试验平台见图 5, 测量掉落后的每组每株穴盘苗钵体的质量为 M_1 , 得到每一组的穴盘苗的平均散落率 S (表 1)。

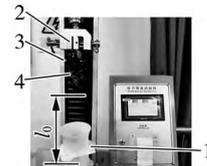


图 5 散落特性试验平台

Fig. 5 Scatter characteristic test platform

1. 运苗杯 2. 万能试验机夹具 3. 万能试验机 4. “绿洲一号”穴盘钵体

表 1 “绿洲一号”穴盘苗散落率结果

Tab. 1 Result of scattering rate of “Oasis No.1” plug seedlings

组号	下落距离/mm	散落率/%
1	100	5.86
2	200	8.88
3	300	12.25
4	400	16.07

注: 散落率 $S = (M_0 - M_1) / M_0$ 。

2 关键结构设计

2.1 取投苗装置数学模型建立

本文研制的取投苗装置可简化为六杆机构 (图 6), 以 O 点为坐标原点, 水平向右、竖直向上方向分别为 x 轴与 y 轴的正向, 建立 xOy 坐标系, 并建立取投苗装置

的取苗针端点 E 点的数学模型^[14]; 主动杆 AH , 机架 AB , 摆杆 (BCD) 中 BD 、 BC 、 DC , 动杆 II (DGH) 中 DH 、 GH 、 DG , 从动杆 CF , 取苗杆 (FGE) 中 GF 、 GE 的长度分别为 $l_0, d_0, d_1, d_3, d_4, d_2, d_5, d_6, d_8, d_7, d_9$; B 点与 H 点、 C 点与 G 点的距离分别为 l_1, l_2 , 其余均于图 6 中注释。

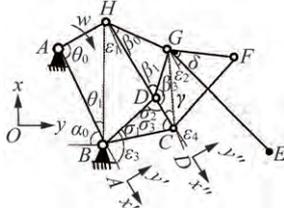


图 6 取投苗装置原理图

Fig. 6 Principle diagram of seedling taking and throwing device

以 A 点为坐标原点, AB 为 x' 轴, 垂直于 AB 方向为 y' 轴, 建立坐标系 $x'Ay'$ 。 $ABDH$ 为平面四杆机构, 封闭矢量如式(1)所示。

$$\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BD} = \overrightarrow{DH} + \overrightarrow{HA} \quad (1)$$

用复数矢量表示如式(2)所示。

$$d_0 + d_1 e^{i\epsilon_3} = d_2 e^{i\epsilon_1} + l_0 e^{i\theta_0} \quad (2)$$

在坐标系 xOy 中, 运用欧拉式 $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$, 式(2)虚部实部分离并消去 ϵ_3 , 可求解 ϵ_1 , 如式(3)~式(6)所示。

$$\begin{cases} d_0 + d_1 \cos \epsilon_3 = d_2 \cos \epsilon_1 + l_0 \cos \theta_0 \\ d_1 \sin \epsilon_3 = d_2 \sin \epsilon_1 + l_0 \sin \theta_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$d_2^2 = d_1^2 + d_0^2 + l_0^2 - 2d_0 d_1 \cos \epsilon_3 - 2l_0 d_1 \cos(\epsilon_3 - \theta_0) - 2l_0 d_0 \cos \theta_0 \quad (4)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\tan^{-1}(Q \pm \sqrt{P^2 + Q^2 - T^2})}{(P - T)} \quad (5)$$

$$\epsilon_1 = \tan^{-1} \frac{Q + d_1 \sin \epsilon_3}{P + d_1 \cos \epsilon_3} \quad (6)$$

未知参数由式(7)计算可得。

$$\begin{cases} P = d_0 - l_0 \cos \theta_0 \\ Q = -l_0 \sin \theta_0 \\ T = \frac{P^2 + Q^2 + d_1^2 - d_2^2}{2d_1} \end{cases} \quad (7)$$

在坐标系 xOy 中, 得到 D 、 H 点位移方程, D 点位移方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} x_D = x_H + d_2 \cos(\theta_1 + \epsilon_1) \\ y_D = y_H + d_2 \sin(\theta_1 + \epsilon_1) \end{cases} \quad (8)$$

H 点位移方程如式(9)所示。

$$\begin{cases} x_H = x_A + l_0 \cos(\theta_0 - \alpha_0) \\ y_H = y_A + l_0 \sin(\theta_0 - \alpha_0) \end{cases} \quad (9)$$

由三角形余弦定理得

$$d_6 = \sqrt{d_2^2 + d_5^2 - 2d_2 d_5 \cos \beta_0} \quad (10)$$

$$d_4 = \sqrt{d_1^2 + d_3^2 - 2d_1 d_3 \cos \sigma_1} \quad (11)$$

$$d_5 = \sqrt{d_2^2 + d_6^2 - 2d_2 d_6 \cos \beta_1} \quad (12)$$

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 + d_4^2 - 2d_1 d_4 \cos \sigma_2} \quad (13)$$

由式(9)~式(12)计算得

$$\beta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{d_2^2 + d_5^2 - d_6^2}{2d_2 d_5} \right) \quad (14)$$

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{d_2^2 + d_6^2 - d_5^2}{2d_2 d_6} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_1 = \cos^{-1} \left(\frac{d_1^2 + d_3^2 - d_4^2}{2d_1 d_3} \right) \quad (16)$$

$$\sigma_1 = \cos^{-1} \left(\frac{d_1^2 + d_4^2 - d_3^2}{2d_1 d_4} \right) \quad (17)$$

以 D 点为坐标原点, DC 为 x'' 轴, 建立坐标系 $x''Dy''$, 其中

$$\beta_3 = 2\pi - \beta_1 - \sigma_2 - (\epsilon_3 - \epsilon_1) \quad (18)$$

x'' 轴与 AD 的夹角为 ϵ_2 , 故

$$\epsilon_4 = \epsilon_3 - \sigma_1 - \sigma_3 \quad (19)$$

由于 $DGFC$ 为四杆机构, 得到

$$\overrightarrow{CF} + \overrightarrow{FG} = \overrightarrow{DG} + \overrightarrow{DC} \quad (20)$$

由上文所述方法可求得 ϵ_2 , 如式(21)所示。

$$\epsilon_2 = \cos^{-1} \left(\frac{d_7^2 + l_2^2 - d_8^2}{2l_2 d_7} \right) - \gamma \quad (21)$$

$$l_2 = \sqrt{d_6^2 + d_4^2 - 2d_6 d_4 \cos \beta_3} \quad (22)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{d_6 \sin \beta_3}{l_2} \right) \quad (23)$$

在 $x''Dy''$ 坐标系, E 坐标为 (x_E'', y_E'') , 故得到 E 点在坐标系 $x''Dy''$ 中的位移方程如式(24)所示。

$$\begin{cases} x_E'' = d_6 \cos \beta_3 + d_9 \cos(\epsilon_2 + \delta) \\ y_E'' = d_6 \sin \beta_3 + d_9 \sin(\epsilon_2 + \delta) \end{cases} \quad (24)$$

将 (x_E'', y_E'') 坐标点转换到坐标系 xOy 中, 得到取苗杆末端 E 点的位移方程如式(25)所示。

$$\begin{cases} x_E = x_H \cos(\alpha_0 + \epsilon_4) - x_E'' \sin(\alpha_0 + \epsilon_4) + x_0 \\ y_E = y_H \sin(\alpha_0 + \epsilon_4) - y_E'' \cos(\alpha_0 + \epsilon_4) + y_0 \end{cases} \quad (25)$$

2.2 优化约束条件

2.2.1 杆件基本约束条件

设计的取投苗装置为具有单自由度的六杆机构, 故各杆件尺寸均大于 0 且满足六杆机构存在的杆长基本约束条件, 并且装置应具有较大的传动角^[15]。

1) 曲柄存在必要条件: 由取投苗装置的数学模型得曲柄存在必要条件, 见式(26)。

$$\begin{cases} l_0 - d_2 - d_1 + d_6 \leq 0 \\ l_0 + d_2 - d_1 - d_6 \leq 0 \\ l_0 - d_2 + d_1 - d_6 \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

2) 传动角约束条件: 为得到更好的工作性能, 设

计机构的传动角应较大, 设定传动角 $\gamma \geq 40^\circ$, 即

$$40^\circ - \arccos\left[\frac{d_2^2 + d_1^2 - (d_0 - l_0)^2}{2d_2d_1}\right] \leq 0 \quad (27)$$

$$\arccos\left[\frac{d_2^2 + d_1^2 - (d_0 - l_0)^2}{2d_2d_1}\right] - 140^\circ \leq 0 \quad (28)$$

3) 装配条件: 本文取投苗装置的装配条件为

$$\max l_2 - d_7 - d_8 \leq 0 \quad (29)$$

$$|d_7 - d_8| - \min l_2 \leq 0 \quad (30)$$

2.2.2 空间约束

为防止取投苗装置的取苗机构与其他装置在空间上发生干涉^[16], 出现送苗—取投苗—运苗之间的某一环节失败, 以机架的 A 点为参考点建立其取投苗的空间约束, 见图 7。

1) 取苗点距机架 A 点的水平距离 L : 为确保取苗的成功率, 应保证距离 $L \geq$ 机架 A 点与穴盘之间距离、苗针插入长度的水平距离之和大于机架 AB 的水平方向的距离, 即

$$L = L_0 + L_3 \cos \varphi_0 \geq d_0 \cos \alpha \quad (31)$$

式中: L_3 ——苗针插入钵体内的深度, mm;

φ_0 ——取苗时, 取苗针与垂直于穴盘方向的夹角, ($^\circ$)。

2) L_1 、 L_9 分别为运苗杯的上部直径与高度, 由现存的移栽机械知, $L_1 = 70$ mm, $L_8 = 80$ mm。

3) 投苗距离 L_6 : 为保证取完的穴盘苗能准确掉落在钵体内, 投苗距离 L_6 应等于运苗杯左侧到 A 点距离与运苗杯上口径的半径之和, 由于运苗杯的上口径直径大于穴盘苗钵体的最大横向直径, 故存在投苗的最大偏移量, 最大偏移量等于运苗杯的上口径半径减穴盘苗钵体的最大横向半径, 即

$$L_6 = L_7 + L_1/2 \pm \Delta L \quad (32)$$

式中: ΔL ——投苗的最大偏移量, mm。

4) 投苗高度: 由上文钵体散落试验得, 穴盘苗投放的高度应低于 300 mm。为降低投放钵体的破碎率, 故投苗点与机架 A 点的竖直距离、A 点到运苗杯底部的竖直距离之和应小于 300 mm, 即

$$L_5 + L_4 + L_8 \leq 300 \quad (33)$$

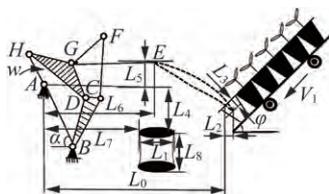


图 7 空间约束条件
Fig. 7 Spatial constraint

2.3 结构参数优化

根据建立的取投苗装置的数学模型, 运用 MatLab

设计工具开发人机交互优化设计软件。用户可根据约束条件区的约束条件与结果提示框的颜色, 调整设计变量区的参数数值, 在优化轨迹区得到取投苗装置的取投苗运动轨迹, 完成装置机构的参数优化。

由上述约束条件与人机交互优化设计软件, 可得初始的取投苗装置得结构参数: $l_0 = 50$ mm、 $d_0 = 120$ mm、 $d_1 = 90$ mm、 $d_3 = 100$ mm、 $d_5 = 35$ mm、 $d_7 = 80$ mm、 $d_9 = 220$ mm、 $\alpha_0 = -55^\circ$ 、 $\beta_0 = 35^\circ$ 、 $\sigma_1 = 10^\circ$ 、 $\delta = -35^\circ$ 。

通过人机交互优化设计软件进一步优化, 确定分取投苗装置的结构参数为: $l_0 = 52.88$ mm、 $d_0 = 123$ mm、 $d_1 = 92$ mm、 $d_3 = 102$ mm、 $d_5 = 36$ mm、 $d_7 = 80$ mm、 $d_9 = 220$ mm、 $\alpha_0 = -54^\circ$ 、 $\beta_0 = 36.8^\circ$ 、 $\sigma_1 = 5.6^\circ$ 、 $\delta = -36^\circ$ 。

2.4 运动仿真分析

为探究取投苗装置的运动规律, 以机架 A 点为坐标原点, 水平向右为 x 轴正向, 竖直向上为 y 轴正向, 建立直角坐标系。根据移栽效率要求^[5], 设置主动杆的角速度为 3.14 rad/s, 设计的装置完成一次取投苗工作为 2 s, 即 30 株/min 的工作效率。据上文设计得到的机构尺寸, 建立取投苗装置的虚拟样机模型, 运用 SolidWorks Motion 插件对其完成运动仿真, 得到取苗针末端位移、速度、加速度仿真结果(图 8)。

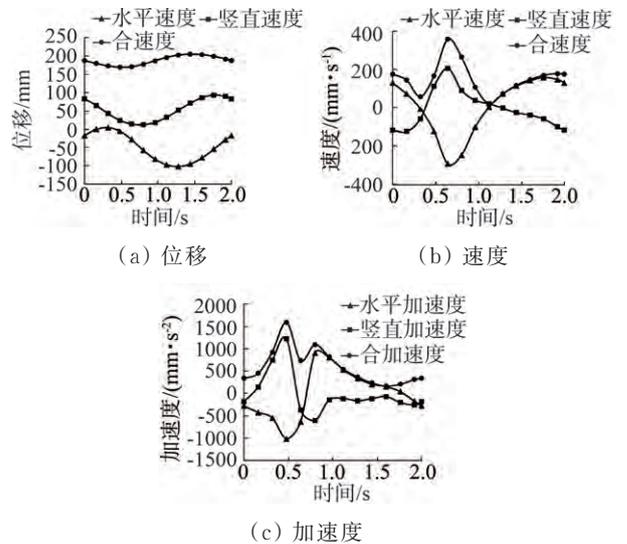


图 8 取苗针末端仿真结果

Fig. 8 Simulation results of taking the end of the seeding needle

由图 8 可知, 在取苗点处, 取苗针末端水平速度为 0 且竖直速度接近于 0, 有利于控制取苗机构夹持钵体, 提高取苗成功率; 在投苗点处, 取苗针末端速度均接近 0, 可保证钵苗竖直下落, 降低其破碎率; 取苗位置处的水平与竖直加速度均较大, 由于装置的惯性导致加速度过大, 将会影响取苗的成功率, 故应保持较低的主动杆的转速, 投苗位置处的水平与竖直加速度均较小, 能够满足投苗要求。

2.5 送苗装置设计

送苗装置倾斜角 φ_0 影响取投苗的成功率, 倾斜角过小会导致取苗针不能按照设计的轨迹插入钵体中, 过大的倾斜角会使穴盘苗倾倒。由图9可知, 取苗针插入与水平面的夹角为 φ_3 , 由前文运动仿真结果得到 $\varphi_3 = 167.91^\circ$, 则 $\varphi_2 = 53.71^\circ$, 得到倾斜角 φ_0 如式(34)所示。

$$\varphi_0 = \varphi_3 - \varphi_1 - 90^\circ \quad (34)$$

式中: φ_1 ——GE杆与水平面的夹角。

在取苗时, 取苗针的末端需尽量在穴盘苗钵体的中部, 故 $0 < \varphi_1 < \varphi_5$, 其中 φ_5 为穴盘中心点与垂直斜面的方向的夹角。

$$\varphi_5 = \arctan(e_2/e_1) \quad (35)$$

式中: e_1 ——穴盘顶部横向距离的1/2, mm;

e_2 ——穴盘高度的1/2, mm。

综上可得 $\varphi_5 = 61.39^\circ$, 故倾斜角 φ_0 的设计范围为: $16.52^\circ \sim 77.91^\circ$, 由文献[17]可知, 为保证穴盘的稳定性, 防止其倾覆, 故送苗装置倾斜角 φ_0 的设计范围为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。

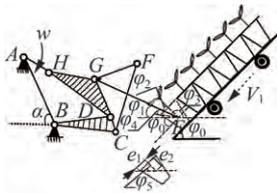


图9 送苗装置设计图

Fig. 9 Design drawing of seedling delivery device

3 取投苗试验与分析

3.1 取投苗轨迹验证

为验证取投苗轨迹的正确性, 将建立的三维模型导入 SolidWorks 软件中, 运用 SolidWorks Motion 插件, 设置主动杆以 3.14 rad/s 角速度转动, 输出仿真运动轨迹, 见图10(a)。搭建取投苗装置的台架试验平台, 主动杆角速度为 30 r/min , 采用 200 W 补光灯对装置进行打光, 使用高速摄像机(Phantom VEO)采集其实际运动轨迹, 采集完成后, 使用摄像机配套 PCC 3.6 软件对视频进行处理, 得到装置的取投苗实际运动轨迹, 见图10(b)。仿真轨迹与样机运动轨迹大致一样, 验证了取投苗装置设计的正确性。



图10 取投苗装置仿真轨迹与实际运动轨迹

Fig. 10 Simulation trajectory and actual motion trajectory of seedling taking and throwing device

3.2 试验条件

为验证该装置取投苗的性能, 将取投苗装置搭载于台架试验台。本次取投苗试验于2023年10月在福建农林大学人工智能试验内开展。试验材料选用福建农林大学旗山校区温室培育30天的“绿洲一号”菌草穴盘苗(穴盘为32穴), 其单个穴孔形状呈长方形锥体, 顶部尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 底部尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 高度为 110 mm , 培育基质为泥炭土、蛭石、珍珠岩(基质配比(体积比)为 $2:1:1$)。

3.3 试验设计与结果分析

3.3.1 试验因素

根据取投苗装置的运动过程, 选择主动杆转速以及送苗装置倾斜角作为试验因素。选择主动杆转速水平为 25 r/min 、 30 r/min 、 35 r/min , 由前文可知, 送苗装置倾斜角的设计范围为 $40^\circ \sim 60^\circ$, 故设定倾斜角的水平为 40° 、 50° 、 60° 。测量的穴盘苗钵体的含水率为 $40\% \sim 80\%$, 由文献[17]知, 穴盘苗钵体的含水率超过 70% , 钵体颗粒之间的黏结力不足, 取苗的失败率将会增加。钵体的力学特性、穴盘苗钵体颗粒之间的黏结力以及钵体与穴盘内壁的摩擦力均受含水率的影响, 故试验钵体的含水率为 50% 、 60% 、 70% 。本次试验因素以及水平见表2。

表2 因素水平表

Tab. 2 Factors and levels table

水平	主动杆转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	送苗装置倾斜角 /($^\circ$)	钵体含水率 /%
-1	25	40	50
0	30	50	60
+1	35	60	70

3.3.2 评价指标

试验选取的评价指标为取苗成功率 Q_1 , 投苗成功率 Q_2 , 取投苗成功率 Q_3 。取苗成功率为取苗针进入穴盘苗钵体中, 夹持穴盘苗并取出, 钵体未发生脱落以及发送较大的破碎的概率; 投苗成功率为取苗机构将取出的穴盘苗运送到运苗杯上方进行投放, 运送时未发生掉落、投放时未掉落到运苗杯以外、投入杯中钵体破碎质量未超过总质量的 $1/3$ 的概率^[18]。

$$Q_1 = \frac{R_1}{R} \quad (36)$$

$$Q_2 = \frac{R_2}{R_1} \quad (37)$$

$$Q_3 = Q_1 \times Q_2 \quad (38)$$

式中: R_1 ——取出且钵体并未出现较大破碎的苗数;

R_2 ——运送运苗杯上方并成功落入杯中完整的苗数;

R——每组试验苗数。

3.3.3 试验方法

采用三因素三水平的正交方案开展试验,试验方

案与结果见表 3。本次试验分为 9 组,每组试验的苗数为 48 株,共进行 432 次试验,对试验数据进行极值和方差分析,可得到最优因素水平参数组合。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment scheme and results of seedling taking and throwing

组号	主动杆转速 / $(r \cdot \text{min}^{-1})$	送苗装置倾斜角/ $(^\circ)$	钵体含水率/%	试验苗数/株	取苗成功数/株	投苗成功数/株	取苗成功率/%	投苗成功率/%	取投苗成功率/%
1	25	40	50	48	44	41	91.67	93.18	85.42
2	25	50	70	48	45	41	93.75	91.11	85.42
3	25	60	60	48	46	43	95.83	93.48	89.58
4	30	40	70	48	43	40	89.58	93.02	83.33
5	30	50	60	48	46	45	95.83	97.83	93.75
6	30	60	50	48	44	42	91.67	95.45	87.50
7	35	50	50	48	42	40	87.50	95.24	83.33
8	35	40	60	48	44	40	91.67	90.91	83.33
9	35	60	70	48	42	38	87.50	90.48	79.17

3.3.4 试验结果分析

3 个水平的主动杆转速对应的取投苗成功率为 86.81%、88.19%、81.94%;送苗装置倾斜角对应的取投苗成功率为 84.03%、87.50%、85.42%;钵体含水率对应的取投苗成功率为 85.42%、88.89%、82.64%。三个因素对于取苗成功率 Q_1 的影响均不显著,主动杆转速以及钵体含水率对投苗成功率 Q_2 的影响显著。取苗时,主动杆的速度过大,取苗针的夹紧时间变短,导致夹持的程度不够,取苗成功率降低^[19];投苗时,速度过大导致取苗机构停留在投苗点时间变短,出现投苗偏移运苗杯中心,破碎量增加。取苗时,含水率过小不利于取苗针插入钵体,含水率过大,钵体松散,力学特性较差,不利于取苗针取出穴盘苗^[20];投苗时,含水率过大会导致钵体颗粒之间的黏附力降低^[21],穴盘苗投入运苗杯的破碎量增加。由表 4、表 5 可得,取苗和投苗成功率的影响因素排序为主动杆转速>钵体含水率>送苗装置倾斜角,综合选择最优因素水平为主动杆转速 30 r/min、钵体含水率 60% 以及送苗装置倾斜角 50°。

表 4 极值分析表

Tab. 4 Range analysis table

指标	因素	A	B	C
Q_1	K_1	281.25	272.92	270.83
	K_2	277.08	277.08	283.33
	K_3	266.67	275.00	270.83
	极差	4.86	1.39	4.17
	主次: $A > C > B$; 最优组合: $A_1B_2C_2$			
Q_2	K_1	277.77	277.11	283.87
	K_2	286.30	284.18	282.21
	K_3	276.62	279.41	274.61
	极差	3.23	2.35	2.53
	主次: $A > C > B$; 最优组合: $A_2B_2C_1$			

表 5 方差分析表

Tab. 5 Analysis of variance table

指标	来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Q_1	A	37.62	2.00	18.81	1.44	0.41
	B	2.89	2.00	1.45	0.11	0.90
	C	34.72	2.00	17.36	1.33	0.43
	误差	26.04	2.00	13.02		
Q_2	A	18.65	2.00	9.32	24.40	0.04
	B	8.65	2.00	4.32	11.32	0.08
	C	16.26	2.00	8.13	21.28	0.04
	误差	0.76	2.00	0.38		

为验证最优因素水平的合理性,开展验证试验,试验苗数为 64 株,得到取苗成功的株数为 61 株,投苗成功的株数为 57 株,即取苗成功率为 95.31%,投苗成功率为 93.4%,取投苗成功率为 89.02%,取投苗效果较好。

4 结论

1) 开展“绿洲一号”菌草穴盘苗钵体的抗压力特性试验以及散落试验,得钵体的力学特性随含水率先增大而后减小,钵体掉落高度在 400 mm 时,其散落率仅为 16.07%。

2) 设计一种六杆式的菌草夹钵式取投苗装置,运用 MatLab 开发人机交互优化软件,优化得到该装置各结构参数。分析其取投苗仿真运动轨迹,搭建实物样机,通过高速摄像机采集实际运动轨迹,验证设计的正确性。

3) 选择主动杆转速、送苗装置倾斜角、钵体含水率作为试验因素,取苗成功率、投苗成功率作为响应指标,开展三因素三水平正交试验,确定取投苗的因素水平组合为主动杆转速 30 r/min、钵体含水率 60%、送苗

装置倾斜角 50° 。

参 考 文 献

- [1] 高方超. 新型牧草巨菌草“绿洲一号”快繁技术研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2020.
- [2] Nackley L L, Kim S H. A salt on the bioenergy and biological invasions debate: Salinity tolerance of the invasive biomass feedstock rundo donax [J]. *Geb Bioenergy*, 2015, 7(4): 752—762.
- [3] 马一凡, 王卫兵, 冯静安, 等. 移栽番茄穴盘苗钵体夹持压缩特性试验研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(1): 64—71.
Ma Yifan, Wang Weibing, Feng Jing'an, et al. Experimental study on compression properties transplanted tomato plug seedlings pot [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 64—71.
- [4] 侯加林, 张二鹏, 张康博, 等. 基于DEM—MFBD的辣椒移栽机取苗装置优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 1—14.
Hou Jialin, Zhang Erpeng, Zhang Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM—MFBD [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 1—14.
- [5] 王蒙蒙, 宋建农, 刘彩玲, 等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 49—57.
Wang Mengmeng, Song Jiannong, Liu Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(14): 49—57.
- [6] 尹大庆, 张烁, 辛亮, 等. 玉米钵苗顶出式有序分秧机构的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 68—74.
Yin Daqing, Zhang Shuo, Xin Liang, et al. Design and test of mechanism of push-out separating seedling for maize pot seedling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(9): 68—74.
- [7] 谢守勇, 张小亮, 刘凡一, 等. 基于钵苗力学特性取苗装置动力学分析与试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*: 2023, 53(11): 1—12.
- [8] 李华, 马晓晓, 曹卫彬, 等. 夹茎式番茄钵苗取苗机构设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 39—48.
Li Hua, Ma Xiaoxiao, Cao Weibin, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism by stem clipping for tomato plug seedling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(21): 39—48.
- [9] 俞高红, 王系林, 刘建刚, 等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 94—103.
Yu Gaohong, Wang Xilin, Liu Jiangan, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot seedlings [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 94—103.
- [10] 刘念聪, 杨程文, 刘保林, 等. 全自动单摆式蔬菜钵苗取苗系统研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 87—95.
Liu Niancong, Yang Chengwen, Liu Baolin, et al. Development of automatic single pendulum vegetable pot seedling picking and feeding system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(22): 87—95.
- [11] 文永双, 张俊雄, 张宇, 等. 蔬菜穴盘苗插入顶出式取苗装置研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 96—104.
Wen Yongshuang, Zhang Junxiong, Zhang Yu, et al. Development of insertion and ejection type seedling taking device for vegetable plug seedlings [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(22): 96—104.
- [12] 叶大鹏, 青家兴, 林志强, 等. “绿洲一号”穴盘苗茎秆力学特性试验[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(10): 1—7, 44.
Ye Dapeng, Qing Jiaying, Lin Zhiqiang, et al. Experiment on mechanical characteristics of stem of “Oasis No. 1” hole seedling [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(10): 1—7, 44.
- [13] 刘姣娣, 曹卫彬, 田东洋, 等. 基于钵苗力学特性的自动移栽机执行机构参数优化试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 32—39.
Liu Jiaodi, Cao Weibin, Tian Dongyang, et al. Optimization experiment of transplanting actuator parameters based on mechanical property of seedling pot [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 32—39.
- [14] 赵萍, 宋皖兵, 顾晨晨, 等. 基于GA—BFGS的六杆下肢康复机构设计[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(10): 50—56.
- [15] 尹文庆, 刘海马, 胡飞, 等. 旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 51—60.
Yin Wenqing, Liu Haima, Hu Fei, et al. Optimization design and experiment on eight-linkage planting mechanism of dryland transplanter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 51—60.
- [16] 徐高伟, 刘宏新, 荐世春, 等. 基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 55—65.

(下转第 53 页)

- 化[J]. 试验技术与管理, 2022, 39(4): 77—83.
- Su Lida, Chang Ruizhi, Yang Yonghai. Structural design and optimization of powdery organic fertilizer applicator [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(4): 77—83.
- [9] 袁虎. 沼液沼渣暗灌施肥机械的研制及关键部件的仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [10] 董剑豪, 毕新胜, 于爱婧, 等. 基于AMESim有机肥—化肥开沟施肥机仿真分析[J]. 液压与气动, 2021, 45(6): 128—134.
- Dong Jianhao, Bi Xinsheng, Yu Aijing, et al. Simulation analysis of ditching fertilizer applicator based on AMESim organic fertilizer-chemical fertilizer [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(6): 128—134.
- [11] 刘宏新, 孟永超, 李彦龙, 等. 沼肥采运车储罐动力学数值模拟与相似模型试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 42—49.
- Liu Hongxin, Meng Yongchao, Li Yanlong, et al. Numerical simulation of dynamic and similarity model test of tank in biogas fertilizer transport truck [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 42—49.
- [12] 孙冬霞, 樊平, 王鹏军, 等. 有机肥施肥机关键部件的有限元分析及试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 9—15.
- Sun Dongxia, Fan Ping, Wang Pengjun, et al. Finite element analysis and test of key parts of organic fertilizer applicator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 9—15.
- [13] 白海超, 衣淑娟, 冯召华, 等. 深施型液态施肥机施肥能量损失试验研究[J]. 南方农机, 2021, 52(10): 80—82.
- [14] 褚斌, 吴爱兵, 韩梦龙, 等. 畜禽粪便堆沤有机肥撒肥机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 58—65.
- Chu Bin, Wu Aibing, Han Menglong, et al. Design and experiment of the organic fertilizer spreader for livestock and poultry manure composting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 58—65.
- [15] 周文琪, 肖红, 刘子铭, 等. SYJ—3深施型斜置式液肥穴施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 78—86.
- Zhou Wenqi, Xiao Hong, Liu Ziming, et al. Design and test of SYJ—3 deep application-type inclined liquid fertilizer hole applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 78—86.
- [16] 李文哲, 袁虎, 刘宏新, 等. 沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 75—80.
- Li Wenzhe, Yuan Hu, Liu Hongxin, et al. Biogas slurry fertilizer applicator for dark irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 75—80.
- (上接第 16 页)
- Xu Gaowei, Liu Hongxin, Jian Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of salvia miltiorrhiza based on five-bar mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 55—65.
- [17] 袁挺, 张宇, 尹金亮, 等. 蔬菜移栽机曲柄摇杆—导轨组合式取苗装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 116—125.
- Yuan Ting, Zhang Yu, Yin Jinliang, et al. Study on seedling taking and throwing device based on combined structure of crank rocker and guide rail for vegetable transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 116—125.
- [18] 谢守勇, 阳尚宏, 刘军, 等. 蔬菜移栽机斜插夹钵式取苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 1—10.
- Xie Shouyong, Yang Shanghong, Liu Jun, et al. Development of the seedling taking and throwing device with oblique insertion and plug clipping for vegetable transplanters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(6): 1—10.
- [19] 崔永杰, 卫咏哲, 丁辛亭, 等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 104—114, 122.
- Cui Yongjie, Wei Yongzhe, Ding Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104—114, 122.
- [20] 王秀, 刘蒙滋, 翟长远, 等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 122—132.
- Wang Xiu, Liu Mengzi, Zhai Changyuan, et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 122—132.
- [21] 周海丽, 刘珂, 童俊华, 等. 温室穴盘钵苗成排取苗移植手部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 82—90.
- Zhou Haili, Liu Ke, Tong Junhua, et al. Design and test of row picking end-effectors for potted seedlings in greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 82—90.